

Білецький В.С., доктор технічних наук, професор
Сергєєв П.В., доктор технічних наук, професор
Воробйов А.П., магістрант
Донецький національний технічний університет

Математичне моделювання процесу грануляції бурого вугілля

Стаття присвячена дослідженню процесу масляної грануляції бурого вугілля. Дослідження виконано методом планування експерименту для чого вибраний центрально-композиційний рототабельний план другого порядку для чотирьох факторів.

Ключові слова: масляна грануляція, буре вугілля, математичне модулювання, планування експерименту.

Статья посвящена исследованию процесса масляной грануляции бурого угля. Исследование выполнено методом планирования эксперимента для чего выбран центрально-композиционный рототабельный план второго порядка для четырёх факторов.

Ключевые слова: масляная грануляция, бурый уголь, математическое моделирование, планирование эксперимента.

Постановка проблеми та стан її вивчення. Буре вугілля займає важливе місце в паливно-енергетичному балансі України – його частка складає 6,6%. В нашій країні зосереджено 3,5% світових запасів бурого вугілля. Його можна використовувати як сировину у процесах брикетування, зрідження, газифікації, піролізу. [1] Водночас воно має ряд специфічних властивостей, які перешкоджають його масштабному використанню: висока вологість і гігроскопічність, висока реактивна здатність до кисню, дещо занижена теплота згоряння. Ці характеристики обумовлюють неможливість його тривалого зберігання, перевезення на великі відстані, велику імовірність самозаймання.

Актуальним також є питання переробки і облагородження бурого вугілля при його гідротранспортуванні. Існує дві принципово різні технології гідравлічного транспортування вугілля. Перша технологія – транспортування у гідросумішах масовою концентрацією $C \approx 50\%$ з подальшим зневодненням на приймальному терміналі. Друга технологія гідравлічного транспортування вугілля – у вигляді висококонцентрованих водо-вугільних суспензій (ВВВС). [2]

Таким чином існує проблема розробки такої технології первинної переробки бурого вугілля, яка б враховувала специфічні властивості вихідного бурого вугілля, умови процесу гідравлічного транспортування вугілля і вимоги до характеристик вугільної сировини подальших операцій по його переробці – піролізу, спалювання, зрідження, брикетування, зневоднення. Рішенням цієї проблеми може стати технологія обробки вугілля масляними реагентами – масляна агрегація.

У роботі [3] нами виконано попередні дослідження масляної агломерації (грануляції) бурого вугілля, що дало змогу встановити область раціональних режимних параметрів, вказати найбільш значимі з них – витрати зв'язуючого, рН середовища і його температура, швидкість обертання вала імпелера мішалки-гранулятора.

Мета цієї роботи – дослідження процесу масляної грануляції бурого вугілля із застосуванням методу планування експерименту та одержання і аналіз математичної регресійної моделі процесу масляної грануляції.

Результати досліджень і їх аналіз.

Для розробки регресійної моделі використовується центрально-композиційний рототабельний план другого порядку. Досліджувався вплив на процес масляної грануляції чотирьох головних факторів: витрати зв'язуючого $Q_{зв}$, температура середовища t_c , швидкість обертання вала імпелера мішалки-гранулятора n , показник рН середовища. Фактори та границі їх варіювання вибрані на основі даних [3] наведені в таблиці 1.

Як вихідне прийняте буре вугілля крупністю 0-1 та 0-3 мм, зольністю $A^d = 10,65\%$, а як реагент зв'язуюче прийнято мазут марки М 100.

Експериментальна область факторного простору: $Q_{зв} = 5-25$ мас.% від вугілля, $t_c = 15-55$ °С, $n = 600-1900$ хв⁻¹, рН = 5-9. Цільова функція – діаметр гранул D. Для розробки плану експерименту та обробки одержаних експериментальних даних використовувалася стандартна комп'ютерна програма Statgraphics 5.1.

Таблиця 1. Фактори, що впливають на процес масляної грануляції, та границі їх варіювання.

Фактор	Код фактора	Одиниця вимірювань	Рівні факторів				
			-2	-1	0	+1	+2
Витрати зв'язуючого, $Q_{зв}$	X_1	мас.%	5	10	15	20	25
Температура середовища, t_c	X_2	°С	15	25	35	45	55
Швидкість обертання вала, n	X_3	хв ⁻¹	600	1000	1300	1600	1900
Показник рН середовища	X_4	-	5	6	7	8	9

При розробці регресійної моделі процесу використано центрально-композиційний рототабельний план другого порядку, який забезпечує однакову похибку по всьому факторному простору [4, 5].

Одержаний поліном з урахуванням значущості коефіцієнтів моделі має вигляд: $D = 0,9 + 0,45 \cdot X_1 - 0,075 \cdot X_2 + 0,116667 \cdot X_3 - 0,25 \cdot X_4 + 0,24375 \cdot X_1^2 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,125 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,175 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,10625 \cdot X_2^2 - 0,0875 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0875 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,01875 \cdot X_3^2 + 0,0125 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,11875 \cdot X_4^2$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 97,9\%$) і низьке значення стандартної похибки експерименту $SE = 0,143284$

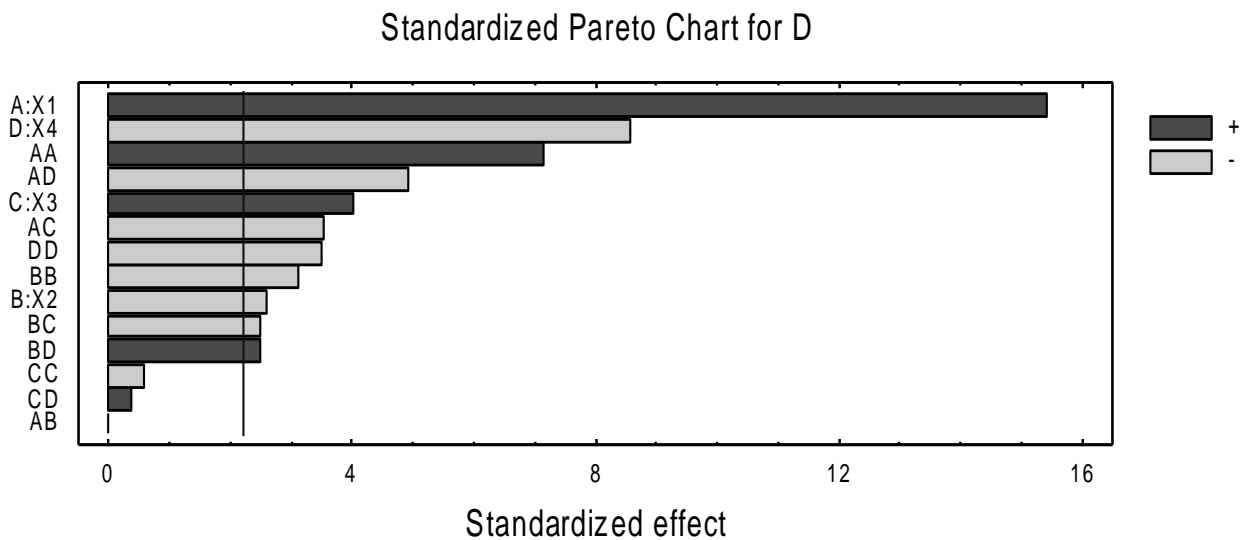


Рис. 1 - Значимість коефіцієнтів моделі (парето-графік)

На рис. 1 подано стандартизований парето-графік, згідно якого коефіцієнти при членах рівняння регресії X_1 , X_4 , X_1^2 , $X_1 \cdot X_4$, X_3 , $X_1 \cdot X_3$, X_4^2 , X_2^2 , X_2 , $X_2 \cdot X_3$, $X_2 \cdot X_4$ статистично значимі. Найбільше впливають на діаметр гранул витрати зв'язуючого X_1 , другим за значимістю фактор – рН середовища X_4 . Інші фактори впливають на цільову функцію значно менше. Збільшення факторів X_1 та X_2 , приводить до збільшення діаметра гранул, а збільшення факторів X_2, X_4 – до його зменшення.

На парето-графіку показано характер і ступінь впливу факторів та ефектів їх взаємодій на діаметр D.

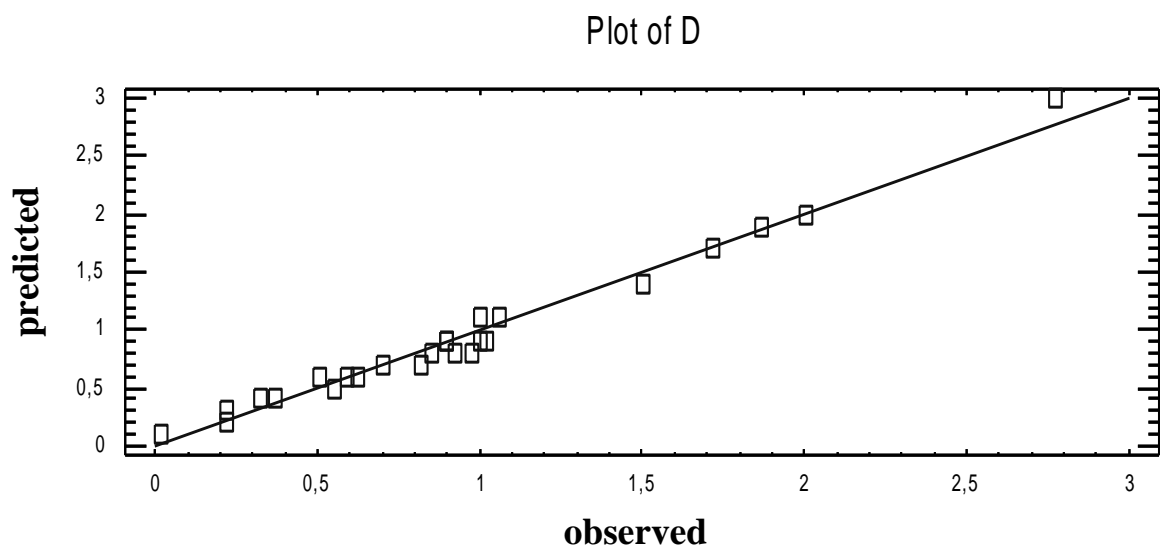


Рис. 2 - Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахованих (predicted) значень цільової функції.

На рис. 2 зображений графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції. Як бачимо, в більшості випадків різниця між цими даними невелика. Більшість експериментальних точок знаходиться поблизу прямої лінії.

На рис. 3. подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_3, X_4)$. На рис. 4 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Простежується чітке збільшення діаметра D вуглемаляних агрегатів (гранул) з ростом витрат зв'язуючого в області $Q_{зв} = 5-25$ мас.%. При збільшення $Q_{зв}$ з 10 до 20 мас.% діаметр D збільшується з 0,7 до 1,7 мм.

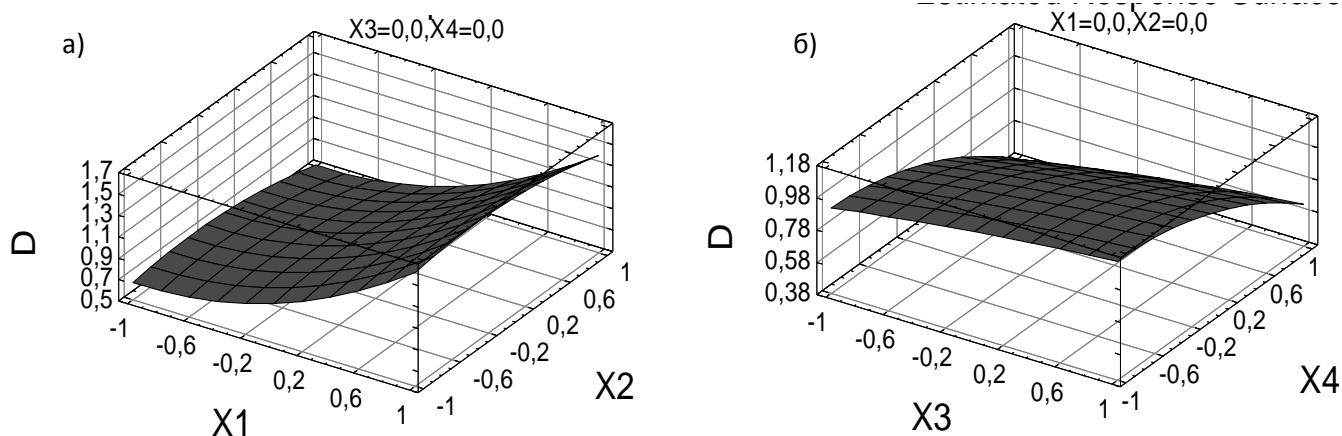


Рис. 3 - Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції:

а) $D(X_1, X_2)$; б) $D(X_3, X_4)$

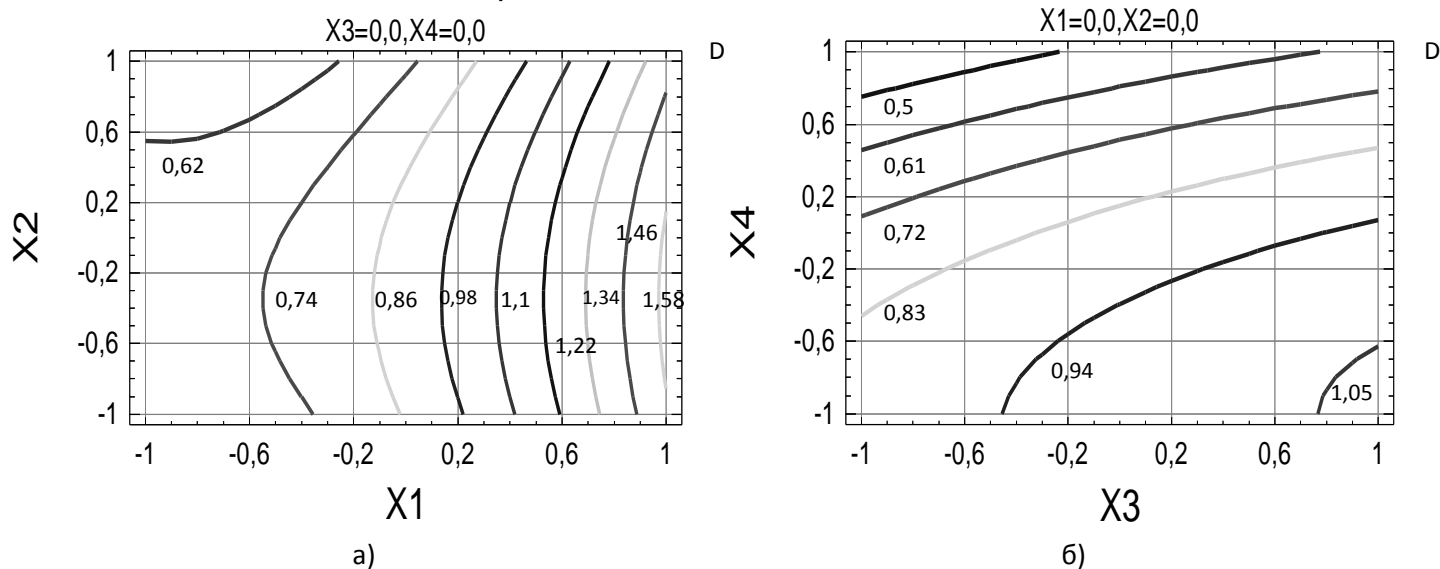


Рис. 4 Контурні криві гіперповерхонь: а) $D(X_1, X_2)$; б) $D(X_3, X_4)$

Результати оптимізації показують, що максимальна крупність гранул складає $D = 3,6$ мм. Режимні параметри, які забезпечують досягнення такого результату у перерахування на натуральні значення факторів: $Q_{зв} = 25$ мас.%, $t_c = 22,5$ °C, $n = 1300$ хв⁻¹, рН = 5.

Висновки

1. За результатами дослідів встановлено, що в процесі грануляції бурого вугілля вплив досліджуваних факторів на діаметр гранул за значимістю має таку послідовність: витрати зв'язуючого, показник рН середовища, швидкість обертання вала, температура середовища.

2. Одержана математична модель процесу грануляції бурого вугілля може бути використана для поглибленого дослідження впливу на процес обраних факторів, а також визначення режимних параметрів що забезпечують максимальну крупність гранул.

У подальших дослідженнях доцільно оцінити технологічні характеристики вугільно-масляних агломератів на основі бурого вугілля як об'єктів брикетування, піролізу, зрідження, газифікації та гідравлічного транспортування.

Література

1. Саранчук В.І., Ільяшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. Основи хімії і фізики горючих копалин. (Підручник з грифом Мінвузу). – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.
2. Круть О.А Водовугільне паливо. – Київ: Наук. Думка, 2002. – 172 с.
3. Білецький В.С., Воробйов А.П. Дослідження масляної агломерації бурого вугілля// Збагачення корисних копалин. - 2012. - №50(91). - С. 142-147.
4. Бродский Б.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей.- М.: Металлургия, 1982.- 752 с.

5. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента.- М.: Металлургия, 1981- 152 с.